УДК 621.313.333

ТЕОРИЯ ТОЧНОСТИ И ЕЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЛЯ РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЯ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ И ИЗГОТОВЛЕНИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

О.П. Муравлев, О.О. Муравлева

Энергосбережение во всех сферах народного хозяйства становится необходимым для выживаемости России в условиях неизбежного включения страны в мировую экономику. Целью настоящей работы является описание теории точности электрических машин и ее использование при проектировании и изготовлении этих машин. За счет снижения рассеивания параметров при изготовлении можно обеспечить ощутимое ресурсосбережение на стадии проектирования асинхронных двигателей, особенно если учесть, что цена материалов быстро увеличивается.

Введение

Международные стандарты по управлению широко используют во всех странах для развития международной торговли, снятия таможенных барьеров, создание доверия к производителям, упорядочения деятельности предприятия и эффективного развития бизнеса. Разработка стандартов ИСО серии 9000:2000 явилась логическим результатом развития системы управления качеством. Основные этапы становления этого стандарта:

- зарождение и развитие отдельных элементов управления качеством в общем процессе управления;
- интеграция отдельных элементов и переход к комплексному управлению качеством;
- тотальное управление качеством, когда качество становится главной целью и основным фактором, определяющим все направления деятельности предприятия;
- глобальный подход к испытаниям и сертификации в условиях международного интегрированного рынка, направленный на обеспечение доверия к изготовителям, испытательным лабораториям и органам по сертификации продукции и систем качества.

Кафедра "Электрические машины и аппараты" Томского политехнического университета вопросами управления качеством в электротехнической промышленности занимается с 1962 года. Она участвовала во всех этапах совершенствования системы управления качеством для предприятий, выпускающих асинхронные двигатели (АД). АД являются самыми распространенными электрическими машинами (ЭМ) и основными преобразователями электрической энергии в мире. При этом всегда использовался системный подход, который рассматривает систему управления качеством, как совокупность взаимосвязанных процессов, и предполагает постоянное улучшение системы через измерение и оценку.

Требование непрерывного повышения качества ЭМ имеет объективный характер и обусловлено закономерностями развития экономики, науки и техники. Кроме того, необходимо учитывать элементы ресурсо- и энергосбережения при их проектировании, изготовлении и эксплуатации. Одним из основных направлений совершенствования АД до настоящего времени было повышение степени использования активных частей путем увеличения электрических и магнитных нагрузок за счет применения новых материалов с улучшенными свойствами. На современном этапе проектирования АД возможности повышения как электрических, так и магнитных нагрузок на основе имеющихся материалов оказались исчерпанными. Однако при проектировании новых серий по-прежнему стоит задача дальнейшего снижения материалоемкости и повышения технического уровня. Достигнутый при проектировании технический уровень необходимо обеспечить при изготовлении, что можно сделать только при наличии эффективно действующей системы управления качеством. Основной недостаток существующей и разрабатываемой систем управление качеством - отсутствие адекватных моделей формирования качества, что не позволяет научно обоснованно подойти к решению проблемы обеспечения и совершенствования качества при проектировании и изготовлении ЭМ. Резкое повышение цен на нефть в 1970 году привело к изменению тем-

пов роста энергопотребления в мировой экономике, и многие страны приступили к реализации энергосберегающих программ. Энергосберегающий характер переустройства является объективно обоснованным свойством современного этапа развития мирового хозяйства. Снижение энергоемкости ВВП всегда наблюдалось, но до 70-х годов XX века энергосбережение было естественным следствием научно-технического прогресса, изменения структуры производительных сил. В 70-90-х годах энергосбережение приобрело целевой характер в большинстве стран мира, ощутивших удар мирового кризиса, но не в нашей стране, где он прошел незаметно. Даже в странах с хорошо отлаженной технологией повышение энергетической эффективности потребовало больших затрат времени и средств [1]. В России не только не преодолены предпосылки кризиса в энергетике, но и продолжаются попытки его не замечать. Все это препятствует реформированию экономики, развитию практически всех отраслей народного хозяйства. В преодолении кризиса особое значение имеют ресурсосбережение и энергосбережение, которые могут быть приравнены к техническому перевооружению и росту эффективности общественного производства. К сожалению, наличие энергетического кризиса никак не отразилось на рекомендациях по проектированию электрических машин [2].

Целью настоящей работы является описание теории точности электрических машин и ее использование при проектировании и изготовлении этих машин.

Работа выполнена по гранту Минобразования России PD02-2.6-199.

Математические модели теории точности электрических машин

Анализ существующих математических моделей (ММ) позволил выбрать три типа моделей, которые удовлетворяют требованиям систем автоматизированного проектирования (САПР) и современным моделям для изучения технологических процессов: *структурная* модель, которая позволяет реализовать системный подход к управлению качеством, установить набор и взаимосвязь элементов, определяющих качество, и определить относительную важность отдельных элементов и параметров для управления качеством ЭМ; *стохастическая* модель с детерминированными операторами для количественной оценки системы формирования качества при проектировании, изготовлении и эксплуатации ЭМ; *имитационная* модель для моделирования и изготовления ЭМ.

Математические модели формирования качества разработаны в первую очередь для АД, которые наиболее распространены в народном хозяйстве. Чем большее распространение получает определенный тип ЭМ, тем целесообразнее заниматься вкладом этих электрических машин в ресурсо- и энергосбережение. Комплекс ММ для АД разработан с использованием системного подхода, на основе общей теории ЭМ, теории точности, теории чувствительности, теории надежности, теории вероятностей и математической статистики.

При разработке структурной модели был использован метод дезагрегатирования проблемы. При этом было построено дерево целей, что позволило установить полный набор элементов на каждом уровне, определить взаимосвязи и соподчиненность между ними и рассчитать коэффициенты относительной важности элементов каждого уровня. Дерево целей отражает иерархическую структуру качества - качество элементов предыдущего уровня является материальной основой обеспечения качества элементов последующего уровня. На рис. 1 представлена структурная модель АД, позволяющая связать показатели технического уровня с показателями технологического процесса (ТП). Верхняя часть модели связана с проектированием ЭМ, а нижняя - с изготовлением [3].

Уровень **А** - качество изготовления АД, которое характеризуется соответствием единичных показателей качества (ПК), представленных на уровне **Б**, требованиям стандартов. Следующий уровень **В** содержит конструктивно-технологические параметры сборочных единиц и отдельных деталей. Граничный уровень модели, общий для проектирования и изготовления - **Г**. Он содержит параметры, контролируемые в процессе изготовления ЭМ. При правильном изготовлении допусков на параметры уровня **Г** и, когда эти параметры при контроле находятся в поле допуска, качество ЭМ должно соответствовать требованиям стандартов. Уровень **В'** иерархической модели обеспечивает формирование качества АД в процессе изготовления, и элементами этого уровня являются ТП. Дальнейшее обобщение нижней части модели - уровень **Б'** - основные сборочные единицы [4].

Таким образом, если совместить нижний и верхний прямоугольники, символизирующие качество АД, то структурная модель имеет две ветви, одна из которых начинается с единичных ПК, установленных государственными стандартами; другая - со сборочных единиц, полученных в процессе изготовления. Встречаются эти ветви на уровне Г, где находятся параметры, определяющие качество, и которые следует контролировать в процессе производства. На основании этой модели разработана методика оценки относительной важности всех элементов, определяющих качество АД. Для количественной оценки уровня качества при изготовлении ЭМ предложен вероятностный критерий - эквивалентная вероятность соответствия качества требованиям нормативно-технической документации.

Обозначения, принятые для структурной модели. Уровень **Б** - единичные ПК: Б.1 - η - коэффициент полезного действия; Б.2 - $\cos\varphi$ - коэффициент мощности; Б.3 - K_M - кратность максимального момента; Б.4 - $K_П$ - кратность пускового момента;

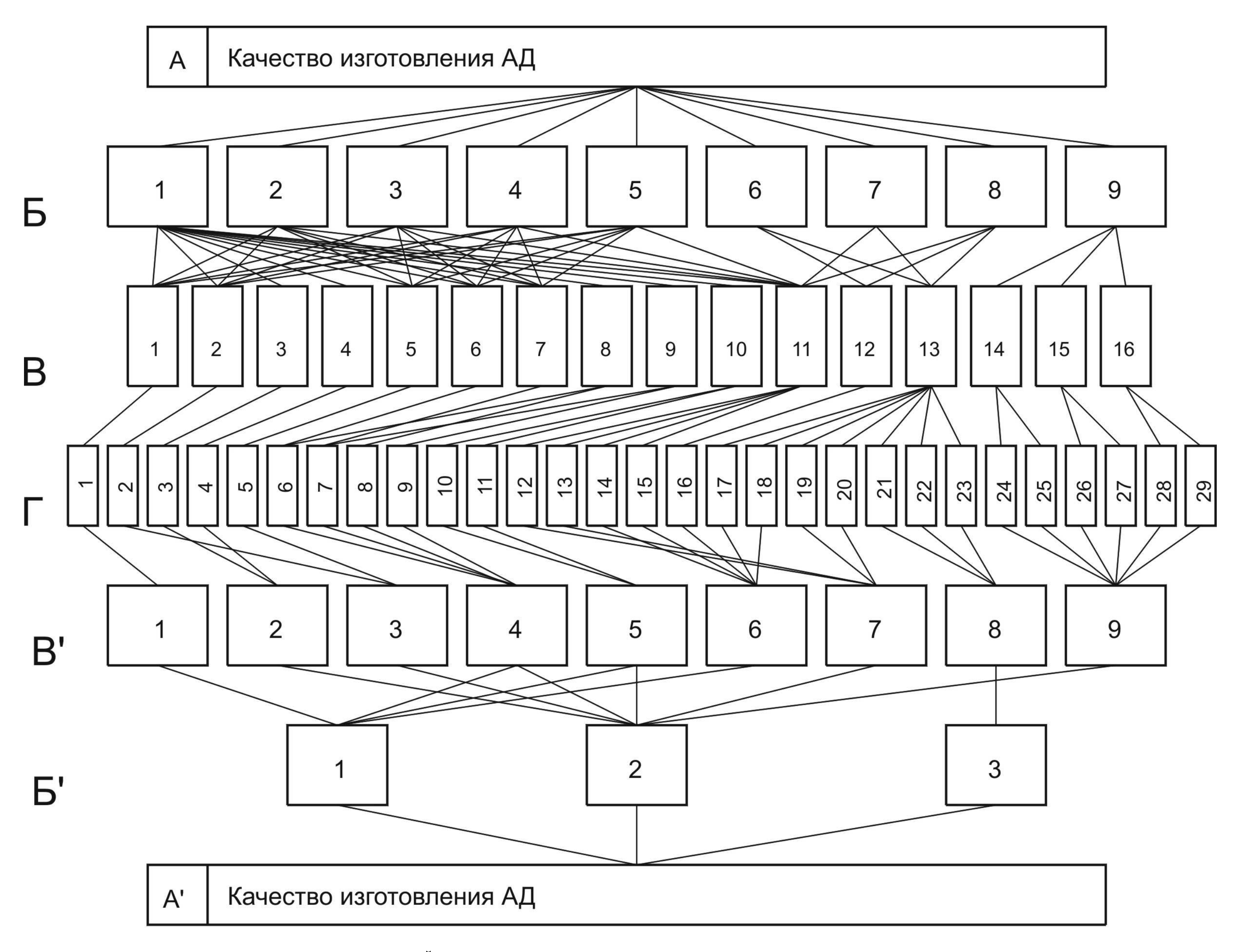


Рис. 1. *Иерархическая модель оценки качества асинхронных двигателей*

Б.5 - K_I - кратность пускового тока; Б.6 - V - вибрационная скорость; Б.7 - L - общий уровень шума; Б.8 - НПУ - надежность подшипникового узла; Б.9 - ВБР - вероятность безотказной работы обмотки статора.

Б': Б'.1 - ротор; Б'.2 - статор-комплект; Б'.3 - подшипниковые щиты.

Проведенная оценка целостности и обособленности рассматриваемой системы показала ее достаточную обособленность для отдельных групп ПК, что позволяет проводить раздельную оптимизацию качества по энергомеханическим и виброакустическим характеристикам и показателям надежности [4, 5].

При разработке ММ формирования качества выходными данными являются единичные ПК, которые установлены стандартами и характеризуют работу ЭМ (уровень **Б** структурной модели для АД). Исходные данные модели - конструктивно-технологические факторы (КТФ) - контролируемые величины, определяющие единичные ПК ЭМ. Для описания формирования качества выбрана стохастическая модель с детерминированными операторами, которая является основой тео-рии точности. При разработке модели приняты следующие допущения: ПК ЭМ y_i являются непрерывными функциями от значений КТФ $X(x_1, x_2, \dots x_i, \dots x_n)$; значения ПК и КТФ - случайные величины, распределенные по закону Гаусса [4].

Модель формирования качества настроена для отклонений ПК и КТФ от средних значений или математических ожиданий. В матричной форме она имеет вид:

$$\Delta Y = C_o + C\Delta X$$

где C_o - матрица-столбец, элементы которой характеризуют систематические погрешности; ΔY, ΔX - столбцовые матрицы, элементами которых являются погрешности факторов и единичных ПК; С - матрица передаточных коэффициентов (детерминированных операторов) преобразующей системы, определяет влияние того или иного фактора на суммарную погрешность единичных ПК.

Применяя теорему о числовых характеристиках линейной функции нескольких взаимно независимых случайных аргументов, получаем математические ожидания и дисперсию погрешностей единичных ПК:

$$M_{\Delta Y} = C_o + CM_{\Delta X}$$
$$D_{\Delta Y} = FD_{\Delta X},$$

где $M_{\Delta Y}$, $M_{\Delta X}$, $D_{\Delta Y}$, $D_{\Delta X}$ - матрицы-столбцы, элементами которых являются математические ожидания и дисперсии ПК и факторов; F - матрица преобразования дисперсий факторов в дисперсии ПК $f_{\gamma j} = C_{\gamma j}^2$.

Для решения прикладных задач, связанных с обеспечением качества при проектировании и изготовлении ЭМ, необходимо перейти к рассмотрению полей допусков и полей рассеивания ПК и факторов На рис. 2 даны необходимые обозначения.

ПК и КТФ являются случайными величинами. Для однозначности определения рассеивания случайной величины, поля допуска и номинального значения параметра приняты следующие обозначения с учетом существующих ГОСТов: $x_н$ - номинальное значение параметра; $\bar{x}$ - среднее значение параметра; e_i - нижнее предельное отклонение; e_s - верхнее предельное отклонение; x_i - значение величины параметра, соответствующее нижней границе поля допуска; x_s - значение величины параметра, соответствующее верхней границе поля допуска; t - поле допуска; x'_i - практически предельное наименьшее значение параметра, при котором вероятность появления значений $x<x'_i$ меньше или равна некоторой допустимой вероятности $P_{iдоп}$, т.е. $P\{x<x'_i\}<P_{iдоп}$, x'_s - практически предельное наибольшее значение параметра, при котором вероятность появления значений $x>x'_s$ меньше или равна некоторой допустимой вероятности $P_{sдоп}$, т.е. $P_s\{x>x'_s\}\leq P_{sдоп}$; $\ell=x'_s-x'_i$ - практически предельное поле рассеивания параметров x; x_ℓ - значение параметра, соответствующее середине поля рассеивания; P_i - вероятность выхода параметров за нижнюю границу поля допуска; P_s - вероятность выхо-

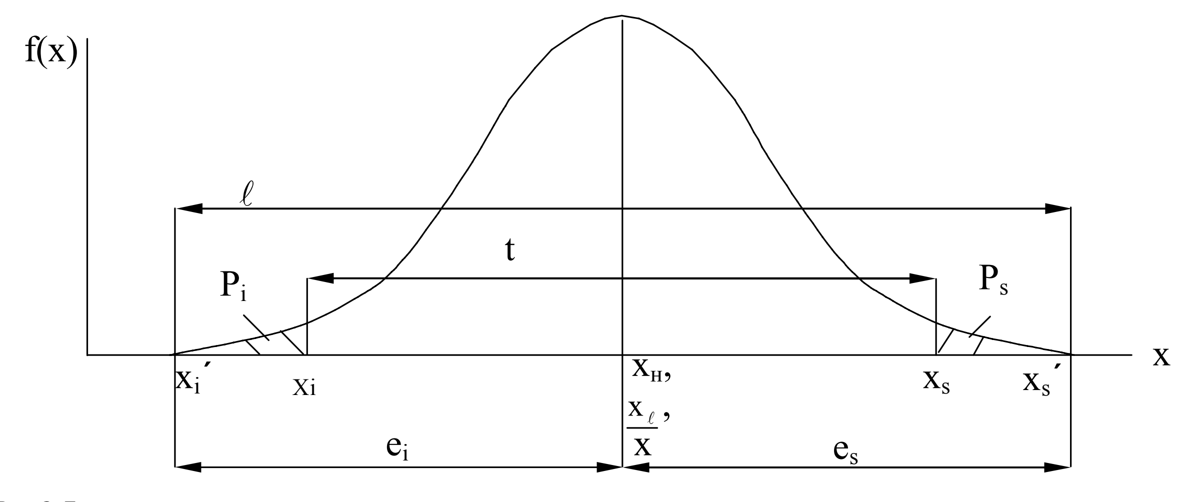


Рис. 2. *Поля рассеивания и допусков при нормальном распределении*

да параметров за верхнюю границу поля допуска.

На основе ММ расчета рассеивания и допусков показателей качества при проектировании и изготовлении асинхронных двигателей разработаны методики расчета допусков и рассеивания ПК АД. Расчет допусков необходимо производить вероятностным методом. Для проведения расчетов необходимо знать допуски t_{xj} или поля рассеивания ℓ_{xj} соответствующих факторов и коэффициенты влияния $C_{\gamma j}$. Величины t_{xj} определяются нормативно-технической документацией, а ℓ_{xj} - точностными возможностями ТП. Коэффициенты влияния могут быть рассчитаны различными методами. При применении ПЭВМ их целесообразно определять численным методом. Значения коэффициентов K_{xj} и K_{yj} выбираются в зависимости от допустимой доли выхода за пределы допуска, наличия контроля и точности измерительных устройств. Поверочный расчет допусков имеет целью по заданным допускам или полям рассеивания на факторы определить поля рассеивания единичных ПК. Система уравнений для расчета допусков вероятностным методом

$$
\begin{aligned}
t_{y1}^2 K_{y1}^2 &= C_{11}^2 K_{x1}^2 t_{x1}^2 + \ldots + C_{1j}^2 K_{xj}^2 + \ldots + C_{1n}^2 K_{xn}^2 t_{xn}^2 \\
t_{y\gamma}^2 K_{y\gamma}^2 &= C_{\gamma 1}^2 K_{x1}^2 t_{x1}^2 + \ldots + C_{\gamma j}^2 K_{xj}^2 + \ldots + C_{\gamma n}^2 K_{xn}^2 t_{xn}^2 \\
&\ldots \qquad \ldots \qquad \ldots \\
t_{ym}^2 K_{ym}^2 &= C_{m1}^2 K_{x1}^2 t_{x1}^2 + \ldots + C_{mj}^2 K_{xj}^2 + \ldots + C_{mn}^2 K_{xn}^2 t_{xn}^2
\end{aligned}
$$

и система уравнений для расчета полей рассеивания ПК

$$
\begin{aligned}
\ell_{y1}^2 &= C_{11}^2 \ell_{x1}^2 + \ldots + C_{1j}^2 \ell_{xj}^2 + \ldots + C_{1n}^2 \ell_{xn}^2 \\
&\ldots \qquad \ldots \qquad \ldots \\
\ell_{y\gamma}^2 &= C_{\gamma 1}^2 \ell_{x1}^2 + \ldots + C_{\gamma j}^2 \ell_{xj}^2 + \ldots + C_{\gamma n}^2 \ell_{xn}^2 \\
&\ldots \qquad \ldots \qquad \ldots \\
\ell_{ym}^2 &= C_{m1}^2 \ell_{x1}^2 + \ldots + C_{mj}^2 \ell_{xj}^2 + \ldots + C_{mn}^2 \ell_{xn}^2 .
\end{aligned}
$$

Для проверки методики расчета допусков было рассчитано большое количество вариантов, результаты которых сопоставлялись с экспериментальными данными для АД серий А, АО, АО2, ВАО, АР, 4А, АИР и RA. Максимальная погрешность расчета при принятых допущениях и выбранных факторах не превышает 15 %. По результатам поверочного расчета можно судить о соответствии полей рассеивания ПК допускам по ГОСТ 183-74 и выделить наиболее существенные факторы, которыми для АД являются удельное сопротивление обмотки ротора, величина воздушного зазора, потери в стали и механические потери. На основании разработанной ММ можно определить вероятность выпуска бракованных АД при установленных стандартами номинальных значениях и допусках для ПК и существующих точностных возможностях ТП. На основе проведенных теоретических исследований произведена количественная оценка влияния контроля на показатели качества. Рассеивание факторов существенно уменьшается после контроля и зависит от точности измерений; появляется возможность улучшения номинальных значений ПК и коэффициента технического контроля. Учет влияния контроля позволяет повысить точность расчета допусков на 3...22 %. Предложена методика установления номинальных значений ПК.

Таким образом, разработана ММ расчета рассеивания и допусков показателей качества при проектировании и изготовлении асинхронных двигателей, которая позволяет рассчитывать допуски на ПК и поля рассеивания. Эта ММ предназначена для включения в САПР АД.

АД в СССР выпускались всех высот осей вращения и экспортировались в десятки стран мира. После распада СССР в России остались заводы, которые выпускают отдельные высоты осей вращения. Чтобы восстановить изготовление АД для диапазона мощностей 0,6...100 кВт оставшиеся заводы вынуждены осваивать выпуск новых. Такое изменение выпуска требует разработки новой концепции по производству, но в проектировании остается по-прежнему основное требование - обеспечить экономию ресурсов [6].

При существующем подходе к проектированию различных типов электрических машин, в том числе и АД, все параметры считаются детерминированными. Проведенные исследования технологии изготовления АД показали, что имеет место большое рассеивание параметров, которое должно быть учтено при проектировании. Рассеивание параметров при проектировании учитывается косвенно - путем создания запасов по показателям качества, что приводит к увеличению материалоемкости. Получается две системы оценки рассеивания: при проектировании назначаются номинальные значения параметров $x_{нi}$ и к этим значениям привязываются поля допусков t_i; при изготовлении определяется среднее значение параметра x_i и поле рассеивания ℓ_i, которые определяются точностью технологических операций. Отсутствие соответствия между $x_{нi}$ - x_i и t_i - ℓ_i приводит или к большим затратам из-за установления излишне жестких требований к точности деталей, или к появлению брака по показателям качества. В ЭМ поле допуска может занимать различное положение относительно номинального значения параметра в зависимости от величины и знака поля допуска. Все допуски разделяются на двухсторонние и односторонние. Двухсторонние допуски обычно назначаются на размеры деталей при изготовлении. Односторонние допуски имеют показатели качества. Наличие односторонних допусков дает проектировщику достаточно большие возможности изменять $\overline{x}_i$ и $x_{нi}$, t_i и ℓ_i. На основе теории точности авторами разработана математическая модель формирования качества АД [1, 2].

Точность является основным количественным критерием, с помощью которого можно управлять качеством ЭМ при проектировании и изготовлении. Для этого ММ формирования качества определяет методологию решения задачи по ресурсос-

бережению при проектировании АД за счет повышения точности при изготовлении. Предлагаемая методология позволяет впервые использовать объективно существующую связь между снижением материалоемкости при проектировании и точностью обеспечения параметров при изготовлении. При этом параметры имеют различную физическую основу и определяются магнитными, электрическими, изоляционными, механическими, тепловыми и другими свойствами, а не только геометрической точностью, как это принято в общем машиностроении.

Для описания формирования качества АД применяется стохастическая модель с детерминированными операторами, которая позволяет проводить моделирование любых показателей качества ЭМ. Рассмотрим алгоритм расчета рассеивания при проектировании. Изменение геометрии поперечного сечения АД повлекло бы за собой изготовление новых штампов для листов статора и ротора, что очень дорого в настоящее время. Поэтому в качестве независимых переменных выбраны длины сердечников статора и ротора ℓ_1 и ℓ_2. Тогда целевые функции для оценки влияния технологических погрешностей на материалоемкость АД по виду материала имеют вид:

$$\Delta M_{стз} = \frac{M_{стз} - D_а^2 \ell_1 \gamma_{ст}}{M_{стз}} \cdot 100\%,$$

$$\Delta M_м = \frac{M_м - 2(\ell_1 + \ell_л)\gamma_м W_1 q_{эф}}{M_м} \cdot 100\%,$$

$$\Delta M_{ал} = \frac{M_{ал} - (z_2 S_с \ell_2 + 2pD_{кл} q_{кл})\gamma_{ал}}{M_{ал}} \cdot 100\%,$$

где $M_{стз}$, $M_м$, $M_{ал}$ - заготовительная масса сердечников статора и ротора, масса меди, масса алюминия обмотки ротора - для существующего серийного производства; $\gamma_{стз}$, $\gamma_м$, $\gamma_{ал}$ - удельные массы стали, меди и алюминия; $D_а$ - внешний диаметр статора; $\ell_л$ - длина лобовой части обмотки; W_1 - число витков фазы статора; $q_{эф}$ - сечение обмотки статора; Z_2 - число зубцов ротора; S_C - площадь паза ротора; $D_{кл}$ и $q_{кл}$ - средний диаметр и площадь поперечного сечения замыкающих колец; $\Delta M_{стз}$, $\Delta M_м$, $\Delta M_{ал}$ - уменьшение массы стали, меди и алюминия в процентах для конкретного варианта расчета.

Ограничениями для данной математической модели служат показатели качества, допуски на которые определяются стандартом России. Уменьшение длин сердечников необходимо проводить до тех пор, пока не выполняется хотя бы одно из ограничений. ММ оценки влияния технологических погрешностей на материалоемкость АД решена на персональных ЭВМ. Она позволяет работать с реальными значениями показателей качества. Расчеты проведены с шагом $\Delta\ell_1 = \Delta\ell_2 = 1$ % для АД АИР112 при числе полюсов 2р = 2, 4 и 6. Ограничением при расчете для этой высоты оси вращения является коэффициент мощности cos φ. При отсутствии рассеивания при изготовлении возможная экономия материалов составит: для электротехнической стали - 10,5...17,5 % и меди обмотки статора - 4,6...6,7 %. Однако предельные значения снижения массы стали и меди практически не могут быть достигнуты, так как всегда есть технологические погрешности и рассеивание показателей качества. Если поля рассеивания при изготовлении уменьшить в два раза по сравнению с существующими, то можно получить снижение массы стали на 10...15 % и массы меди на 4...6 %, что вполне соизмеримо со снижением материалоемкости при переходе от серии 4А к серии АИР при выпуске АД.

Заключение

Таким образом, за счет снижения рассеивания параметров при изготовлении асинхронных двигателей можно обеспечить ощутимое ресурсосбережение на стадии проектирования, особенно если учесть что цена материалов быстро увеличивается. Реальное снижение рассеивания параметров возможно в настоящее время, так как двигатели выпускаются небольшими партиями, на современном оборудовании и с эффективной системой контроля, что нельзя было сделать при массовом производстве. Этот способ ресурсосбережения хорошо вписывается в САПР на стадии оптимизации электрической машины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Литвак В.В. Основы регионального энергосбережения. - Томск: Изд-во НТЛ, 2002. - 300 с.
2. Проектирование электрических машин: Учебник для вузов. - В 2-х кн. // И.П. Копылов, Б.К. Клоков, В.П. Морозкин, Б.Ф. Токарев. - М.: Энергоатомиздат, 1993.
3. Муравлев О.П. Разработка теории и практических методов управления качеством электрических машин // Электричество. - 1986. - № 4. - С. 29-32.
4. Muravlyov O., Muravlyova O., Shapkina O. Mathematical Model of Quality Shaping in Design and Production of Electrical Machines // Proc. of Intern. Conf. Design to Manufacture in Modern Industry. - Maribor: Faculty of Mechanical Engineering, 1997. - P. 454-461.
5. Muravlyov O., Shapkina O., Muravlyova O. New Peculiar Way of Material Capacity Decrease in Induction Motor Design // Proceedings of 43 Internationales Wissenschaftliches Kolloquium (Ilmenau), 21-24.09 1998, Technische Universität Ilmenau. Thuringen. Band 4. - P. 441-445.
6. Муравлев О.П., Муравлева О.О. Влияние точности изготовления на материалоемкость асинхронных двигателей // В сб.: Электронные и электромеханические системы и устройства. Труды XVI научно-техн. конференции. - Томск: Изд-во НПЦ "Полюс", 2001. - С. 287-292.